

PFAS 汚染の実態とその問題点

有害性が指摘される有機フッ素化合物PFASとは何か。
長年にわたる調査・研究からその実態と問題点を明らかにするとともに
国民の暮らしと健康を守るためにいま求められる対策について論述する。

有機フッ素化合物のなかま PFASとは

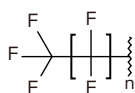
ペルおよびポリフルオロアルキル物質 (Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS)) は有機フッ素化合物のうち特定の化合物の一群を示すものであり、単一の物質ではない。有機フッ素化合物は有機物に含まれることから、炭素や水素、酸素などから構成されるものであるが、炭素と水素との結合の代わりに炭素とフッ素の結合が多く見られるものである。専門的に言えば、完全にフッ素化されたメチル基 (CF_3) またはメチレン基 ($-\text{CF}_2-$) を持つペルフルオロアルキル鎖を持つ化学物質を示すものである (※1)。経済協力開発機構 (OECD) の2018年報告書では4700種類以上とされたが、米国環境保護庁 (USEPA) の新たな定義も提案されてさらに対象が増えるものである (図)。なお、炭素と結びついていないフッ素化合物は無機フッ素化合物であり、むしろ菌予防などでも使用されているが、PFASには含まれない。

これらPFASはそれぞれの物質の特性に応じて種々の利用がある。図に示されているペルフルオロオクタンスルホン酸 (PFOS) は衣類、食品包装の撥水・撥油剤 (代表的な製品にスリーエム社 (3M社) のスコッチガード) の構成原料、泡消火剤、メッキ液のミスト防止剤、各種塗料・インキのレベリング剤、半導体リソグラフィのフォトレジストのような多様な産業用途があった。ペルフルオロオクタン酸 (PFOA) はフッ素樹脂の製造工程での使用のほか、PFASの副生成物としても含まれる。

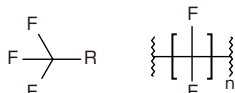
PFOS、PFOAは1940年代から製造されてきた化合物であり、これらの製造、使用、廃棄の過程により、環境へ放出されてきた。3M社、デュポン社が動物実験や従業員の疫学研究を行い、有害性についての懸念を持っていたことが米国環境保護庁への届け出、また米国での住民による集団訴訟における裁判所への提出文書から判明している (※2)。そうして、3M社は2000年5月にPFOS、PFOAの製造を2002年末までに自主的に廃止することを発表した (※3)。難分解性、生物蓄積性があることを主とした理由としていたが、上記の有害性の懸念も判断に働いたと考えられる。ここから、新たな環境問題として認識されは

図 PFASの化学構造と定義

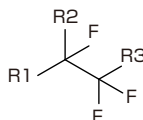
PFASの定義



Buckらによる定義 (2011)

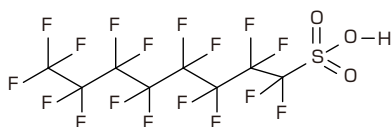


OECDによる定義 (2021)

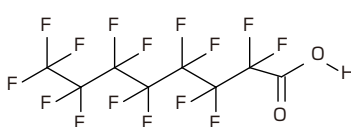


米国環境保護庁による定義 (2021)

代表的なPFAS



ペルフルオロオクタンスルホン酸 (PFOS)



ペルフルオロオクタン酸 (PFOA)

原田 浩二 (はらだ・こうじ)
京都大学大学院医学研究科 准教授

じめた。

PFASは専門用語ではないが、“Forever chemicals”（永遠の化学物質）と呼ばれているのは、ペルフルオロアルキル鎖以外の部位は環境中、生体内で分解、代謝を受けるが、最終産物としてPFOS、PFOAなどのペルフルオロアルキル酸（PFAS）になりうるためである。PFASはそれ以上の分解を極めて受けにくい、環境に残留しつづける。PFOS、PFOAほど生物蓄積性が高いPFASでも長期的にみれば環境汚染の問題がある。そのため、欧州連合（EU）などで、まとめてPFASとして評価、管理の対象と提案されてきている（※4）。

PFAS汚染の広がり

種々のPFASのうち、3M社が主に製造してきたPFOS、PFOAがどれだけ環境に広がっていたかの調査は徐々にはじまった。日本でも、2002年より京都大学の小泉昭夫教授（現名誉教授）などの研究チームでは水質調査を全国規模で行った（※5）。検出される濃度は1リットルあたりナノグラム（10億分の1グラム）で表される濃度が多かった。極めて低い濃度であるが、後に述べるように、近年ではこの水準でのリスク管理が提案されることとなっている。この調査ではおおむねPFOS、PFOAは都市部に近い河川で高く検出され、東京の多摩川（東京・神奈川の都県境）や大阪の淀川が代表的であった。その流域にある下水処理場の放流口の近くで最大値を示し、生活排水、工場排水などに含まれていることが

伺われた。PFOS、PFOAの組成にも特徴があり、多摩川ではPFOSが高く、淀川水系の安威川（大阪）などではPFOAが高かった。関連しうる排出源の一つとして泡消火剤を使用する在日米軍横田基地、ダイキン工業淀川製作所などである可能性が考えられた。このほか、2000年代には地方自治体の環境研究所などによる調査も行われ、各地域で河川、地下水で比較的高い地点が報告されていた。空港の周辺や廃棄物処分場の浸出水なども含まれていた（※6）。われわれのPFASへの曝露する経路の一つは水道水である。2000年代では都市部の水道水にはPFOS、PFOAが10から50 ng/lほどで検出されていた（※5）。大気からの曝露は一般的には少ないものの、フッ素化学工場の近傍では主要な曝露源となっていた（※7）。食品からの摂取も日本人で共通して基礎となる曝露源であると考えられ、魚介類摂取量と血液中濃度が相関していた（※8）。家庭でのハウスダストにもPFASは検出されており、家庭内にも発生源があり、日用品を通じた曝露も想定される（※9）。ハウスダストからはPFOS、PFOAのほか、ペルフルオロアルキル基の炭素の長さが異なる種々のPFASが検出され、多様なPFASが製品に使われていることが示唆された。異なるPFASの組成は製造方法の違いを示しているものと考えられた。

2000年の3M社のPFOS、PFOA製造廃止や、米国環境保護庁によるフッ素樹脂メーカーへの自主的排出削減の取り組みの呼びかけ（2010/2015 P

FOA Stewardship Program ※10）、ストックホルム条約での規制を経て、新規製造、使用がほぼなくなったと考えられた。このストックホルム条約（※11）は残留性有機汚染物質（Persistent Organic Pollutants : POPs）の規制を国際的に行う枠組みであり、POPs条約とも呼ばれる。PFOS、PFOAやほかのいくつかのPFASはPOPsとしての性質を持つている。ストックホルム条約で、POPsに分類されるものには、DDTなどの「農薬」、ポリ塩素化ビフェニルなどの「工業原料」、ごみ焼却過程で発生するダイオキシンなどの「非意図的生産物」の三つに分類され、自然環境中では分解されにくい、食物連鎖を通じ生物体内において高濃度に蓄積される、海洋や大気などによる長距離移動性、ヒトや生態系に対する有害性を有する物質として特徴づけられる。2009年にPFOS、2019年にPFOAと関連物質が制限対象、廃絶対象と指定され、それにより、日本国内でも「化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律」（化審法）において第一種特定化学物質と指定され（2010年PFOS、2021年PFOA）、新規製造、輸入が制限されている。

それにより例えば日本国内の河川水中のPFOS、PFOA濃度の減少は見られた。一方でPFOS、PFOAは土壌への吸着性を示し、周辺への地下水へ徐々に浸透していくと考えられている。フッ素化学工場、泡消火剤を使用する空港、基地周辺での汚染事例は数多く報告され、地下水を通じて水道水を汚染した事例があった（※12）。米国

での最近の推計では5万7412カ所もの
泡消火剤による潜在的汚染があるとされ、
米軍関連施設で3493カ所が指摘され
(※13)、地下水が米国環境保護庁の2016
年生涯健康勧告値であるPFOS、PFOA
合計濃度70 ng/ℓを超える箇所が多く
含まれる。

日本国内では2014年から沖縄県企
業局は水道水のPFOS、PFOAを測定
し、2016年に米国環境保護庁の健康
勧告値を超える濃度を検出してきたこと
を公表した(※14)。北谷浄水場の取水源は
在日米軍嘉手納基地からの大工廻川が注
ぐところに位置していた。それまで、日本
国内ではPFAS問題が大きく意識されて
いなかったなか、PFASの汚染が、3M社の
自主的廃止やストックホルム条約による禁止
の後も残存していることを示した。また京
都大学による調査でも大阪府摂津市近傍
の地下水にも高濃度のPFOAが2016
年でも残留していることがわかった(※15)。
汚染が生じうる施設としては上述のよう
に、泡消火剤の使用がある空港、基地、
フッ素樹脂製造、加工を行う施設、メッキ、
半導体製造工場などがある。またそれ
らの廃棄物を受け入れる可能性がある最
終処分場も留意すべきである(※16)。実際
に、兵庫県神戸市、沖縄県沖縄市、京都府
綾部市では最終処分場を上流にもつ河川で
高濃度のPFASが検出される事例があ
る。その際の発生源のPFASの組成は使
用されたものの組成をおおよそ反映するた
め、特徴的なパターンが見られれば、特定の
手がかりにもなりうる。

PFAS曝露と ヒトバイオモニタリング

PFASは水道水、食事など多様な曝露
経路がありうるが、個別の評価ではなく、
個人の体内にあるPFAS量を総合して評
価するためには、血液や尿などを用いたバイ
オモニタリングが有用である。PFOSやP
FOAは生体内半減期が数年以上あり、摂
取量が減少しても体内に残留する性質か
ら、血中濃度は信頼性のある指標である。
例えば、京都大学で2003年から2004
年に国内10地点の住民の血中PFOS、P
FOA濃度を測定したが、PFOAは特に関西
の調査地で高いことを示し、水道水などの
影響を明らかにすることができた(※17)。
また3M社のPFOS、PFOA製造廃止以
降、特異的な汚染がない地域ではPFOS、
PFOA濃度が徐々に低下してきたことも
わかった(※18)。曝露低減対策を行った効
果で実際に個人の曝露レベルが下がること
を検証するためにも有用である。

一方でPFASが残留している地域では曝
露レベルは低下していなかった(※19)。前述
の沖縄県中部の北谷浄水場では水道水中
のPFOS濃度が高く、その浄水は40万人
を超える地域に配水されていた。2019
年に宜野湾市住民からの調査の要望が
京都大学に伝えられ、血中濃度の分析を
行った。平均血漿中PFOS濃度は13・
9 ng/mlであった。さらに他のPFASであ
るペルフルオロヘキサンスルホン酸(PFHxS)
は16・3 ng/mlとPFOSと同等であった。

この後、2022年には市民により、宜野湾
市以外へも調査が拡大された(※20)。沖縄
県内6市町村、387名の分析結果、北谷
浄水場の配水域、その他の水道水中PFAS
が高かった金武町で血漿中PFOS、PFOA
は平均10から14 ng/mlと高かった。また
水道水を浄水器無しで使用する住民では
より濃度が高く、水道水が曝露要因であ
ったと考えられた。

東京都多摩地域でも水道水中PFOS
濃度が高く、2019年半ばで水道水源の
切り替えが行われていた。2020年にNP
Oによる血中PFAS濃度調査が行われて
おり、2022年から2023年にかけて市
民らによる多摩地域全域でのバイオモニタ
リング調査が行われた。このうち、国分寺市の
住民で平均血漿中濃度はPFOS 16・7 ng
/ml、PFHxS 17・7 ng/mlであった(※21)。
このPFOS濃度は周辺の自治体でも汚染
が特にならない西多摩、南多摩地域より2から
3倍の濃度となっていた。

健康リスクとの関係

PFASの汚染と健康リスクとの関わり
を判断する指標は、水道水の暫定目標値
などがある。米国環境保護庁は2016年
にPFOS、PFOA合計値として70 ng/ℓ
を公表した(※22)。これは実験動物(ラッ
ト)での新生仔の成長抑制の指標をもとに
算出された。2020年には厚生労働省、
環境省による水道水暫定目標値、公共用
水域暫定指針値50 ng/ℓがそれぞれ発表
されたが、米国環境保護庁と同様の指標が

ら算出された。米国環境保護庁は2022年6月に新たな暫定勧告値を発表し、PFOS・02 ng/l、PFOA 0.004 ng/lとした。これは種々の疫学研究による健康影響を検証し、もともと低濃度で起こり得る可能性がある指標から算出した。実験動物より低濃度でも影響がありうることを考慮したものである。特にデンマークで行われたジフテリア・破傷風二種混合ワクチン接種後の抗体誘導が抑制されること(※23)をもつとも低濃度の影響とした。それ以外の疫学研究で観察された影響の指標を用いても1 ng/lを下回る。健康リスクを予防するには極微量でも避けるべきという方針となった。2023年3月に米国環境保護庁は法的基準案(最大汚染濃度 Maximum Contaminant Level)としてPFOS、PFOAそれぞれに4 ng/lを提案した(※24)。これは健康リスクが予防できると保証したものではなく、分析定量下限をもとに設定されたものである。望ましい目標である最大汚染濃度目標(Maximum Contaminant Level Goal)は、発がん性が疑われることからゼロ ng/lとされたが法的拘束力はない。この基準は2024年4月に正式決定され、2029年に完全実施される。

血液中のPFAS濃度についての指針として、ドイツ環境庁のHBM-IIではPFOS 20 ng/ml、PFOA 10 ng/ml(妊娠可能年齢女性ではそれぞれ半分の濃度)(※25)、米科学・工学・医学アカデミーは7種のPFASの合計値で20 ng/mlを超えないこと(※26)を勧告した。これらは種々

の研究結果から、脂質異常症、甲状腺ホルモン疾患、新生児の出生体重の低下、妊娠高血圧症候群、腎臓がんのリスク上昇の可能性があるとされている。それらの疫学調査で統計学的なリスクに差があったレベルとして設定されたものである。ドイツHBM-IIでは目標値を超える場合に、曝露低減と住民へのカウンセリングの提供の選択肢があるとしている。さらに米国アカデミーの臨床ガイダンスでは、関連が報告されている疾患について診察、検査を推奨している。日本でPFAS汚染が見られた沖縄、東京、大阪などの調査地域ではこの指標を超える血中濃度が参加者の数割で見られ、相当数の住民について健康リスクが懸念されている。

今後の課題

日本において、2020年の暫定目標、暫定指針値が設定されて以降、PFASによる汚染が各地で新たに発見されてきている。それでも公共用水域で網羅的な調査がなされているわけではなく、また水道水のPFAS測定、結果公表、対策も義務ではない。早期に汚染箇所を特定するためには行政、事業者の相互の協力のもとでPFASの使用実績のある事業所などを把握していく必要があるだろう。実際に発生源の特定まで進まない自治体が多いが、関係が疑われる事業所の協力が得られるにかかっている。さらにPFASの汚染状況について地域住民が情報を得られること、その対策を説明し、住民の不安とニーズに対応する必要がある

と考える。日本では法的な基準はまだ策定されていないが、実態把握と汚染の防止に向けた取り組みが求められる。また有害性の研究、疫学研究への助成が2024年に行くつか立ち上がっているが、海外では既に多くの知見が集積されており、それらを踏まえた対応がリスクの予防につながると考える。もちろん日本での知見も期待されるが、PFAS曝露の高い地域での取り組みも必要と考える。

- ※1 [https://one.oecd.org/document/ENV/CBC/MONO\(2021\)25/En/pdf](https://one.oecd.org/document/ENV/CBC/MONO(2021)25/En/pdf)
- ※2 <https://www.ewg.org/research/decades-polluters-knew-pfas-chemicals-were-dangerous-hid-risks-public>
- ※3 <https://www.latimes.com/archives/la-xpm-2000-may-17-fi-30979-story.html>
- ※4 <https://tenbou.nies.go.jp/news/fnews/detail.php?i=35028>
- ※5 https://www.jstage.jst.go.jp/article/joh/46/1/46_1_49/_article/-char/ja/
- ※6 https://www.city.sapporo.jp/eiken/annual/no37/documents/37_10.pdf
- ※7 <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es101948b>
- ※8 https://www.jstage.jst.go.jp/article/joh/55/3/55_12-0264-OA/_html/-char/ja
- ※9 <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.09.024>
- ※10 <https://www.epa.gov/assessing-and-managing-chemicals-under-tsca/fact-sheet-20102015-pfoa-stewardship-program>
- ※11 <https://www.env.go.jp/chemi/pops/treaty.html>
- ※12 <https://doi.org/10.1021/es102769t>
- ※13 <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00502>
- ※14 <https://www.eb.pref.okinawa.jp/sp/water/82/3017>
- ※15 <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.09.006>
- ※16 <https://doi.org/10.3985/mcwmr.32.50>
- ※17 <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.05.010>
- ※18 <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.01.027>
- ※19 <https://cir.nii.ac.jp/crid/1524232505290382720>
- ※20 <https://www.qab.co.jp/news/20221018156868.html>
- ※21 https://www.tokyo-np.co.jp/tags_topic/PFAS/4
- ※22 <https://www.epa.gov/sdwa/past-pfoa-and-pfos-health-effects-science-documents>
- ※23 <https://doi.org/10.1001/jama.2011.2034>
- ※24 <https://www.epa.gov/sdwa/and-polyfluoroalkyl-substances-pfas>
- ※25 <https://doi.org/10.1016/j.jrtp.2021.104868>
- ※26 <https://doi.org/10.17226/26156>